

СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ДВУХШАРНИРНЫХ АРОК

Дорофеев В.С., *д.т.н.*, **Мацей Р.А.**, *к.т.н.*, *доцент*,
Пушкарёв Н.В., *к.т.н.*, *доцент*, **Коломийчук Г.П.**, *к.т.н.*, *доцент*

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры,
г. Одесса*

Расчетные схемы двухшарнирной арки с различными условиями опирания (рис.1,а,б) предполагают отсутствие изгибающих моментов опорной части. В проведенных ранее экспериментах на моделях железобетонных арок [1,2] не удалось обеспечить выполнение этого условия.

С целью экспериментального исследования моделей железобетонных арок, которые по условиям опирания соответствуют данным расчетным схемам изготовлены их модели, спроектирован и изготовлен специальный испытательный стенд, имитирующий расчетные схемы (рис.1,а,б).

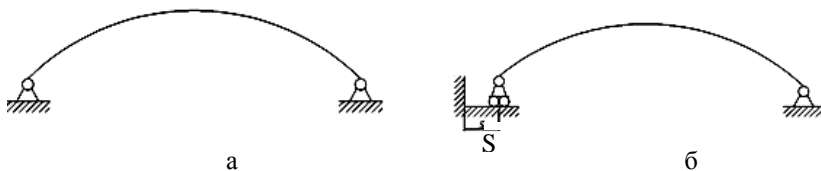


Рис.1 Расчетные схемы круговой двухшарнирной железобетонной арки: а – с двумя неподвижными опорами; б – с одной неподвижной и со второй подвижной опорой.

Железобетонные арки армировались одним плоским криволинейным каркасом К-1. Арматурный каркас 1, 2 (рис.2) на концах жёстко соединен с концевыми опорными металлическими втулками 5 для последующей установки готового изделия на цапфы (оси) испытательного стенда. Вблизи шарнирных втулок на длине ≈ 150 мм металлический каркас усилен за счет установки вдоль образующей втулки четырех дополнительных консольных стержней арматуры 4 (рис. 2) длиной ≈ 150 мм, диаметром 4 мм, приваренных одним концом к втулке 5, что обеспечивает более высокую прочность участка арки вблизи опорной втулки по сравнению с её остальной частью. Другим свободным концом консольные стержни

прикрепляются к поперечной арматуре 3 (рис.2) диаметром 4 мм, которая, в свою очередь, соединяется с двумя центральными стержнями арматурного каркаса 1, 2 при помощи скруток.

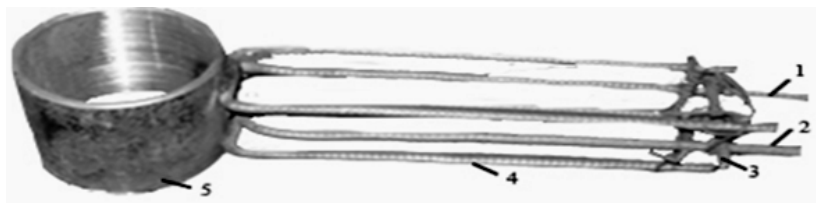


Рис.2 Соединение арматурного каркаса с концевой опорной втулкой арки: 1, 2 – арматурный каркас К-1; 3 – поперечная арматура; 4 – консольный стержень арматуры длиной ≈ 150 мм; 5 – концевая опорная втулка железобетонной арки.

Арматурный каркас (рис.3) изготовлен из холоднотянутой проволоки Вр-1 из низкоуглеродистой стали, применяемой для армирования железобетонных конструкций, имеющей следующие характеристики: диаметр 4 мм, глубина вмятины $h = 0,2$ мм, шаг вмятины $S = 2,5$ мм. Для обвязки арматурного каркаса, составленного из проволок диаметром 4 мм, используется стальная малоуглеродистая, термообработанная проволока без покрытия диаметром 1,2 мм.

При испытании опорные втулки моделей железобетонных двухшарнирных арок устанавливаются на цилиндрические цапфы опорных узлов испытательного стенда, образуя плотное подвижное соединение выпукло-вогнутых поверхностей. На основании [1] можно предположить, что контактные давления в подвижном соединении (шарнире) распределяются по цилиндрической поверхности цапфы в окружном направлении по закону косинуса, а линия контакта ограничивается углом $\pi/2$.

Тогда реакция на опорной цапфе от действия внешнего усилия со стороны концевой опорной втулки железобетонной арки определяется выражением:

$$R = 2b \sigma_{\max} \int_0^{\pi/4} \cos^2 \varphi r d\varphi,$$

где b – ширина втулки, равная ширине железобетонной арки; σ_{\max} – максимальное контактное напряжение на поверхности цапфы; φ – угол, определяющий интенсивность контактного давления (напряжения); r – радиус цапфы.

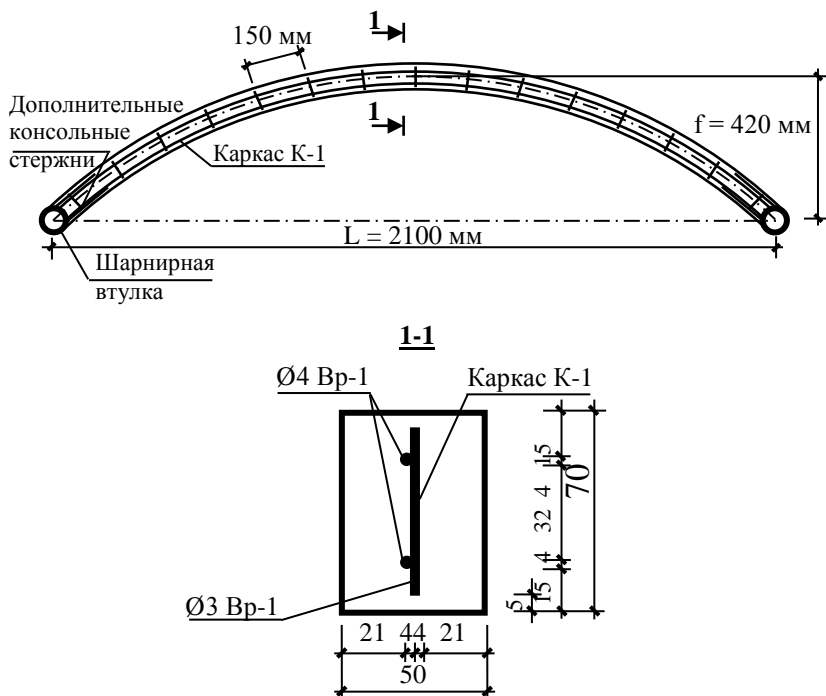


Рис.3. Армирование арок: L – пролёт модели арки; f – стрела подъёма арки

При конструировании и изготовлении испытательного стенда для испытаний моделей двухшарнирных железобетонных арок предъявляются следующие конструктивные и технологические требования:

- стенд предназначен для испытаний арок вертикальной статической нагрузкой;
- стенд обеспечивает шарнирную схему опирания двухшарнирной железобетонной арки;
- конструкция опорных узлов стенда обеспечивает отсутствие изгибающих моментов на опорных втулках концевых шарниров железобетонной арки;
- обеспечивается достаточная плотность прилегания концевых опорных втулок арки к цапфам опорных узлов стенда, при этом характер их контактного взаимодействия практически такой же, как и в балансирном шарнире [1];
- один из опорных шарниров арки неподвижен, второй может быть как неподвижным (рис.1,а), так и подвижным (рис.1,б), имеющим

возможность перемещаться в горизонтальном направлении на заданное экспериментом расстояние S (рис.1,б) за счет особенностей конструкции опорного узла и деформаций арки под действием внешней нагрузки;

- все детали, узлы и соединения стенда обладают достаточной жесткостью при минимальных затратах материала на изготовление и выдерживают постоянство размеров при действии номинальной нагрузки на протяжении всего срока эксплуатации;

- обеспечивает точностные показатели установочных размеров стенда с точностью до 0,5 мм на весь период его использования;

- обеспечивает выполнение условий техники безопасности, как при упруго-пластической деформации, так и при потере железобетонной аркой несущей способности под действием внешней нагрузки;

- обеспечивает удобство монтажа и демонтажа стенда и измерительных приборов;

- обладает удобным устройством нагружения, измерения и поддержания постоянства уровня внешней нагрузки во времени;

- установка и транспортировка стенда выполняется без применения грузоподъемных механизмов;

- обладает достаточной технологичностью при изготовлении и использовании;

- обладает конструктивной целесообразностью, антикоррозионной стойкостью и хорошими эстетическими показателями.

Для удовлетворения перечисленным выше требованиям сварные элементы стенда изготовлены из конструктивной малоуглеродистой стали обычного качества с гарантируемой свариваемостью и несклонностью к отпускной хрупкости. Сварка деталей и сборочных единиц стенда выполнялась электродами без последующей термообработки. В качестве исходных материалов применен листовой прокат толщиной 5 и 6 мм, швеллер №8, стальной стержень $\varnothing 52$ мм, профильная квадратная труба 25×25 мм.

Стенд для испытания моделей железобетонных арок с двухшарнирной схемой опирания (рис.4) состоит из следующих конструктивных элементов и включает горизонтально расположенную основу 19 в виде трубы квадратного профиля, которая своей нижней плоскостью опирается на горизонтальную плоскость станины 2 гидравлического пресса и воспринимает горизонтальные составляющие распорных усилий двухшарнирной железобетонной арки 20 (рис.5) под действием внешней вертикальной нагрузки.

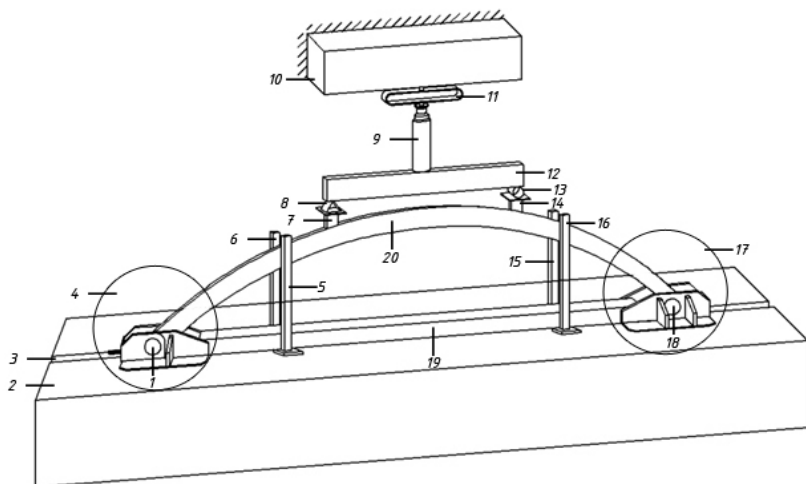


Рис 4. Стенд для испытания моделей железобетонных арок с двухшарнирной схемой опирания

К правому и левому концу трубы квадратного профиля основы стенда 19 приварены левый 4 и правый 17 опорные узлы, включающие цилиндрические опорные цапфы 1, 18 (рис.4), на которые в процессе испытаний насажены и опираются опорные втулки 21, 22 концевых шарниров железобетонной арки 20 (рис.5). Один из торцов цапфы имеет головку большего диаметра, а во второй торец завернута резьбовая шпилька, на которую насаживается через отверстие стопорная шайба, прижимающаяся к торцу цапфы зажимной гайкой и фиксирующая положение цапфы на опорных узлах стенда в осевом направлении.

Конструкция правого опорного узла в собранном виде (рис.6,б) представляет собой горизонтальную пластину 27, которая опирается на горизонтальную плоскость станины 2 (рис.4) гидравлического пресса и две вертикальные пластины 26, 30, которые приварены к горизонтальной пластине 27 симметрично по разные стороны от испытываемой железобетонной арки на расстоянии, равном её ширине с небольшим зазором.

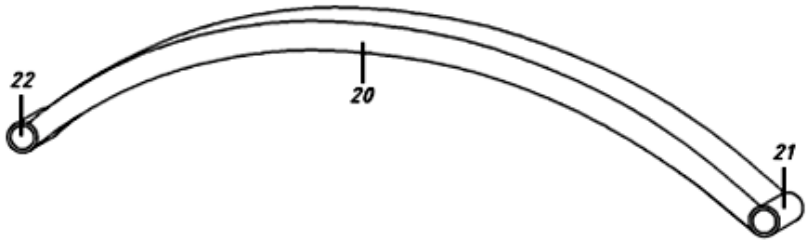
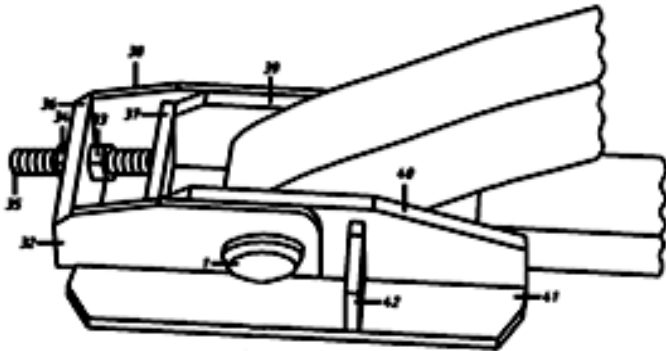
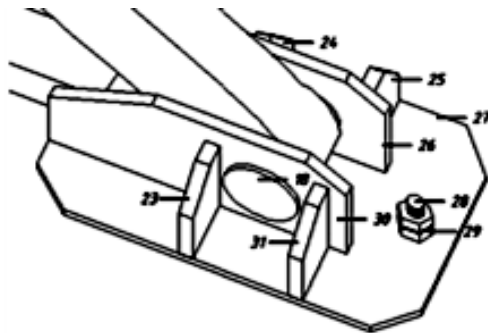


Рис.5. Железобетонная арка с концевыми опорными втулками.



а



б

Рис.6. Опорные узлы испытательного стенда: а – левый; б – правый

Горизонтальная 27 и две вертикальные пластины 26, 30 правого опорного узла дополнительно соединены между собой ребрами жесткости 23, 24, 25, 31 с помощью сварки. В вертикальных боковых пластинах 26, 30 расточены отверстия, в которые устанавливается металлическая цилиндрическая опорная цапфа 18. По отношению к неподвижным отверстиям в боковых пластинах 26, 30 (рис.6,б)

правого опорного узла, в которые установлена цилиндрическая цапфа 18, последняя имеет одну степень свободы – угол поворота и является цилиндрической шарнирной опорой для опорной втулки 21 (рис.5) испытываемой железобетонной арки. Горизонтальная пластина 27 правого опорного узла стенда закрепляется на горизонтальной плоскости станины 2 (рис.4) гидравлического пресса с помощью болтового соединения 28, 29 (рис.6,б). Один конец крепежного болта 28, изготовленный в виде головки, вставлен в горизонтальный паз 3 станины 2 (рис.4) гидравлического пресса, а другой конец, проходя через отверстие в горизонтальной пластине 27 правого опорного узла, закрепляет её сверху с помощью гайки 29, жестко прижимая правый опорный узел к станине гидравлического пресса.

Конструкция левого опорного узла в собранном виде (рис.6,а) содержит неподвижную опорную часть (рис.7,а) и подвижный ползун (рис.7,б), который сварен из трех пластин и имеет П-образную форму. В двух боковых вертикальных пластинах 32, 38 ползуна, параллельных продольному направлению стенда расточены отверстия 46, 47 (рис.7,б) диаметром, равным диаметру опорной цапфы. Опорная часть левого узла (рис.7,а) выполнена в виде горизонтальной пластины 41, которая опирается на горизонтальную плоскость станины гидравлического пресса и двух вертикальных пластин 39, 40, приваренных к горизонтальной пластине 41 симметрично по разные стороны от испытываемой железобетонной арки на расстоянии, равном её ширине с боковым зазором 0,5 мм. Горизонтальная 41 и две вертикальные пластины 39, 40 левого опорного узла дополнительно соединены между собой ребрами жесткости 42 с помощью сварки. В вертикальных пластинах 39, 40 выфрезерованы два горизонтальных направляющих пазов 43, 45 (рис.7,а) высотой, равной диаметру цапфы. Цапфа в момент установки на неё опорной втулки модели арки имеет возможность свободно скользить по пазам 43, 45 неподвижной части опорного узла стенда в горизонтальном направлении, образуя подвижное соединение.

К третьей неподвижной вертикальной пластине 37 (рис.7,а) левого опорного узла, которая расположена перпендикулярно продольному направлению стенда приварена резьбовая шпилька 35, по которой перемещаются отверстие 48 пластины 36 (рис.7,б) ползуна, а по резьбе – зажимные гайки 33, 34 (рис. 6,а), расположенные по обе стороны от отверстия 48 пластины 36 (рис.7,б), которые жестко фиксируют её необходимое текущее горизонтальное положение совместно с ползуном, левой опорной цапфой и насаженной на неё концевой опорной втулкой арки в номинальном горизонтальном положении.

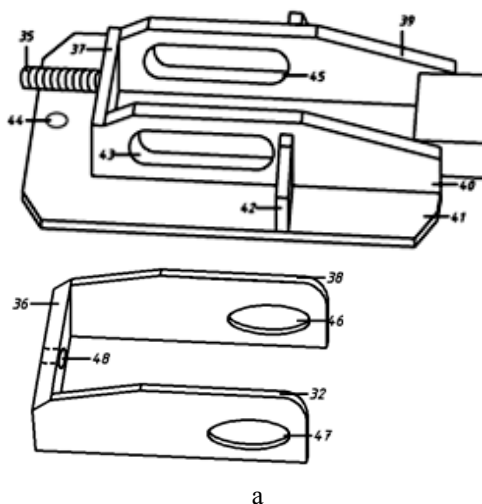


Рис.7. Детали левого опорного узла: а – неподвижная часть; б – подвижный ползун

Горизонтальная пластина 41 (рис.7,а) левого опорного узла закрепляется на горизонтальной плоскости станины 2 (рис.4) гидравлического пресса с помощью болтового соединения, установленного головкой болта в паз 3 станины, другой конец которого, пройдя через отверстие 44 (рис.7,а) в горизонтальной пластине 41 левого опорного узла, закрепляет пластину сверху с помощью зажимной гайки, жёстко прижимая неподвижную часть левого опорного узла к станине гидравлического пресса. К трубе основания 19 стенда на расстоянии $1/3$ его общей длины от торцов приварены четыре вертикальные направляющие стойки 5, 6, 15, 16 (рис.4) из квадратного профиля, которые при действии внешней нагрузки обеспечивают устойчивость железобетонной арки в номинальном положении при упруго-пластических деформациях, а также безопасность проведения эксперимента при потере аркой несущей способности.

Нагружающее устройство содержит два пуансона 7, 14 (рис.4), которые установлены на алебастровом растворе на выпуклой стороне испытуемой железобетонной арки. На пуансоны установлены шарниры в виде ножевого 8 и цилиндрического шарнира 13, которые сверху прижимаются к пуансонам 7, 14 массивной траверсой 12, имеющей квадратный полый профиль. Сверху на середине траверсы 12 установлен гидравлический домкрат 9. На подвижную верхнюю пяту гидравлического домкрата 9 сверху установлена нижняя опора силоизмерителя 11. Верхняя опора силоизмерителя 11 упирается в верхнюю массивную плиту 10 гидравлического пресса, которая в

процессе нагружения остается неподвижной. Для нагружения модели арки статической нагрузкой используется гидродомкрат 9 с ручным насосом, обладающий высокой плавностью хода. Силоизмеритель работает на механическом принципе с использованием упругих элементов, соединенных со стрелкой указателя, по положению которой фиксируется отсчет уровня нагрузки по шкале.

Конструкция стенда позволяет проводить испытания моделей железобетонных арок в соответствии с различными расчетными шарнирными схемами опирания (рис.1,а,б). В случае, когда стенд имитирует расчетную схему (рис.1,а), одна из опорных цапф стенда неподвижна. Вторая опорная цапфа обладает дополнительной подвижностью в горизонтальном направлении только в момент монтажа арки на стенд. Эта степень свободы опорной цапфы обеспечивает плотную посадку деталей концевых шарниров, компенсируя неточности межосевого расстояния опорных втулок арки, обусловленных полем допуска на изготовление изделия. В этом случае стенд работает в следующем порядке. Зажимные гайки 33, 34 на резьбовой шпильке 35 (рис.6,а) неподвижной основы, с помощью которых фиксируется положение пластины 36 подвижного корпуса ползуна по отношению к левой неподвижной опорной части, раскручиваются в направлениях по разные стороны от пластины 36, так, что благодаря отверстию 48 в пластине 36 ползуна (рис.7,б), через которое проходит шпилька 35, ползун совместно с левой опорной цапфой может свободно перемещаться по пазам 43, 45 (рис.7,а) и шпильке 35 неподвижной опорной части в горизонтальном направлении. Благодаря этому опорные втулки 21, 22 (рис.5) испытываемой железобетонной арки, несмотря на неточность изготовления межосевого расстояния, легко устанавливаются на цилиндрические опорные цапфы 1, 18 стенда (рис.4), обеспечивая плотное прилегание втулок к опорным цапфам. После обеспечения плотной посадки опорных втулок на цапфы, положение левой цапфы, которая проходит через отверстия 46, 47 (рис.7,б) в ползуне, опорной втулке железобетонной арки и пазы 43, 45 (рис.7,а) в неподвижной опорной части фиксируется совместно с ползуном и левой втулкой арки в горизонтальном номинальном положении путем закрепления вертикальной пластины 36 корпуса ползуна на шпильке 35 с помощью зажимных гаек 33, 34 (рис.6,а). Таким образом, после установки испытываемой арки на стенд и выбора зазоров в опорных концевых шарнирах, положение подвижной опорной цапфы жестко фиксируется относительно неподвижной части левого опорного узла, в результате чего опорная втулка арки становится неподвижной в горизонтальном направлении.

В случае, когда стенд имитирует расчетную схему (рис.1,б), одна из опорных цапф неподвижна, а вторая за счет деформации арки под

действием внешней нагрузки и подвижного соединения в левом опорном узле перемещается в горизонтальном направлении совместно с опорной втулкой арки и ползуном по направляющим пазам неподвижной части опорного узла на заданную экспериментом величину S (рис.1,б). Заданная величина допустимого горизонтального перемещения S подвижной цапфы совместно с левой опорной втулкой арки и ползуном устанавливается положением стопорной гайки 34 на шпильке 35 (рис.6,а). При этом поперечная пластина ползуна 36 своим отверстием 48 (рис.7,б) перемещается по направляющей неподвижной резьбовой шпильке 35 (рис.7,а) на величину, обусловленную деформацией арки, соответствующей определенному текущему уровню нагрузки. Заданная экспериментом (максимально допустимая) величина горизонтального перемещения S подвижного концевой шарнира арки регламентируется положением упорной гайки 34 на резьбовой шпильке 35. Горизонтальное перемещение левой концевой опорной втулки арки совместно с цапфой, обусловленное наличием подвижного соединения и деформацией арки под действием внешней нагрузки, прекращается после упора пластины 36 корпуса ползуна в стопорную гайку 34, установленную на определенной экспериментом длине S шпильки 35, отсчитываемой от неподвижной части левого опорного узла. Подвижное соединение, включающее цапфу и опорную концевую втулку арки, перемещаясь по направляющим пазам и шпильке, после достижения выставленного на необходимое расстояние S упора, становится и остается неподвижным в горизонтальном направлении при последующем повышении уровня внешнего нагружения.

Индикаторы для измерения перемещений исследуемых сечений железобетонной арки под действием внешней нагрузки установлены над и под её нижней поверхностью на специальных штативах и фиксируют начальные и текущие показания индикаторов. Для измерений применялись индикаторы часового типа, действующие при упоре штифта с ценой деления 0.01 мм и диапазоном показаний (ходом штифта) 10 мм. Схема расположения измерительных приборов представлена рис.8.

Последовательное ступенчатое нагружение центральной части траверсы 12, которая, в свою очередь, передает внешнюю нагрузку на пуансоны 7, 14 через шарниры 8, 13, осуществляется с помощью гидродомкрата 9 (рис.4). Последовательное ступенчатое нагружение на железобетонную арку и регистрация показаний приборов перемещений и силоизмерителя прекращается при потере железобетонной аркой несущей способности.

Выводы:

1. Разработаны чертежи и технология изготовления испытательного стенда для экспериментальных исследований моделей двухшарнирных железобетонных арок.

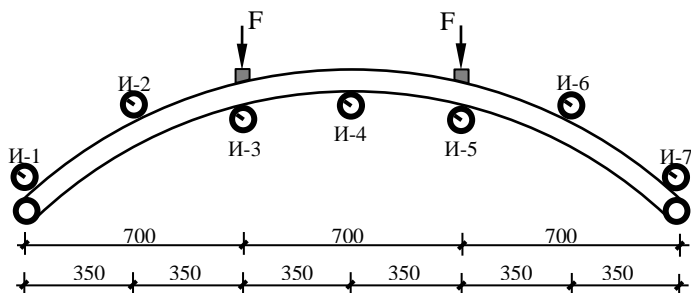


Рис.8. Схема установки приборов на арках

2. Изготовлен испытательный стенд необходимого технического уровня, обеспечивающий за счет конструктивных особенностей опорных узлов, шарнирную схему опирания моделей двухшарнирных железобетонных арок с разными граничными условиями опирания.

3. Проведенные на стенде экспериментальные исследования по определению несущей способности моделей двухшарнирных арок показали эффективность предложенной конструкции стенда.

Summary

The description of the test stand for experimental research models of the double-hinged reinforced concrete arches is in article.

1. Ерохин М.П. Экспериментально-теоретические исследования железобетонных арок при длительном воздействии нагрузки / Автореферат на соиск. уч. степ. к.т.н. Ленинград: ЛИСИ, 1970. – 24 с. 2. Бабич Е.М., Кислюк Д.Я. Дослідження роботи двошарнірних залізобетонних арок при короткочасному повторному навантаженні // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Вип.16, частина 2. – Рівне, 2008. – С.40-47. 3. Учебник для строительных вузов. Металлические конструкции. Т.2. Конструкции зданий. Под ред. В.В. Горева, Москва "Высшая школа", 2002", 492 с.